

# Simulador Orientado a Objetos de la Central Nuclear Embalse

Gustavo Boroni<sup>1</sup>, Marcelo Cuadrado<sup>2</sup>, Germán Guido Lavalle<sup>3</sup> y Alejandro Clausse<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional del Centro  
Campus Universitario, Pje. Arroyo Seco, 7000 Tandil, ARGENTINA  
Tel.: (54-2293) 15503103, E-Mail: [gboroni@exa.unicen.edu.ar](mailto:gboroni@exa.unicen.edu.ar)

<sup>2</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional del Centro  
Campus Universitario, Pje. Arroyo Seco, 7000 Tandil, ARGENTINA  
Tel.: (54-2293) 421451, E-Mail: [mcuadrad@exa.unicen.edu.ar](mailto:mcuadrad@exa.unicen.edu.ar)

<sup>3</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional del Centro  
Avda. del Libertador 8250, 1429 Buenos Aires, ARGENTINA  
Tel.: (54-11) 47041045, E-Mail: [geguido@cnea.gov.ar](mailto:geguido@cnea.gov.ar)

<sup>4</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro, CONICET  
Campus Universitario, Pje. Arroyo Seco, 7000 Tandil, ARGENTINA  
Tel.: (54-2293) 440363, E-Mail: [clausse@exa.unicen.edu.ar](mailto:clausse@exa.unicen.edu.ar)

## Abstract

Se presenta el diseño de un código de simulación de la operación de la Central Nuclear Embalse Río Tercero. El software fue desarrollado siguiendo el paradigma de objetos, lo cual permite una gran flexibilidad para el mantenimiento y generalización de la herramienta.

Se usaron modelos matemáticos compilados de numerosos trabajos realizados en los últimos 20 años en el Instituto Balseiro, que carecían de un soporte moderno computacional. El simulador fue validado contra datos provistos por la planta, mostrando excelente acuerdo.

## 1 - Introducción

A lo largo de esta presentación mostraremos el desarrollo de un simulador computacional del circuito primario de la Central Nuclear Embalse Río Tercero. La herramienta desarrollada consiste en un analizador virtual de la planta, construido a partir de los modelos matemáticos que la describen, de un entorno gráfico para su configuración y visualización de resultados.

El modelo matemático fue construido en base a trabajos existentes en el área. Debido a que estos trabajos modelaban parcialmente la planta, nuestra tarea consistió en tomar partes de los mismos y formar un modelo completo. Por su parte, el circuito primario fue dividido conceptualmente en un conjunto de nodos a efectos de analizar las propiedades del refrigerante en cada punto de dicho circuito. En este aspecto radican las diferencias de este trabajo con los anteriores, desde el punto de vista del modelo matemático.

La aplicación fue diseñada e implementada utilizando el paradigma orientado a objetos. El modelo y su implementación fueron validados utilizando documentación emitida por la ARN (Autoridad Regulatoria Nuclear) y parámetros de diseño especificados por los constructores del reactor (AECL de Canadá). A partir de este simulador, validado y testeado, es posible realizar diversos análisis acerca del funcionamiento de la planta.

## 2 - Descripción de la Central Nuclear Embalse Río Tercero

La Central Nuclear Embalse Río Tercero es una planta generadora de electricidad del tipo CANDU 600 (CANadian Deuterium Uranium). Este tipo de reactor utiliza agua pesada (D<sub>2</sub>O) como medio de transporte de calor [QUI79], y es alimentado con uranio natural. Los elementos

combustibles se encuentran dentro de tubos por donde circula el refrigerante a alta presión. El refrigerante, luego de pasar por los tubos de presión, es enviado al generador de vapor (4 en total), donde transfiere su energía térmica al circuito secundario, regresando luego al reactor bajo la acción de bombas de circulación. El vapor generado en el circuito secundario es enviado a las turbinas, desde donde el vapor pasa al condensador. El agua allí condensada es recirculada nuevamente a los generadores de vapor a través de precalentadores que permiten mejorar el rendimiento.

El circuito primario consta de: Núcleo, Ramas frías, Ramas calientes, Lado primario de los generadores de vapor y un Presurizador entre otros componentes. Por su parte, el secundario consta de: Lado secundario de los generadores de vapor, Precalentadores, Turbinas, y un Condensador entre otros. La coordinación del funcionamiento de estos elementos esta a cargo de los sistemas de control. En este trabajo solamente modelamos el circuito primario, fijando la frontera de simulación en el lado secundario de los generadores de vapor.

## **2.1 - Núcleo**

Es la fuente de generación de calor de la planta. Consiste en un conjunto de tubos de presión a través de los cuales circula refrigerante, absorbiendo el calor generado por la fisión del uranio contenido en los elementos combustibles. Los tubos de presión son 380, dispuestos de forma horizontal, y divididos en dos circuitos independientes. Cada tubo de presión posee 12 elementos combustibles, cada uno de los cuales contiene 37 barras con pastillas de uranio.

El mecanismo normal utilizado para controlar la potencia del reactor son los “Absorbedores de control de  $H_2O$  o zonas líquidas”. Consisten en 6 tubos colocados dentro del núcleo en los cuales se introduce agua liviana. La función del agua es absorber neutrones, atenuando así la reacción en cadena de fisiones.

El modelo matemático que rige el funcionamiento del núcleo se construyó teniendo en cuenta trabajos previos: las ecuaciones de cinética neutrónica puntual fueron tomadas de [GUI94], los sistemas de control y reactividad fueron tomados de [MEO83] mientras que el modelo de los tubos de presión será discutido más adelante.

## **2.2 - Ramas frías y calientes**

Son las cañerías que transportan el refrigerante entre el núcleo y el lado primario de los generadores de vapor. Poseen bombas para elevar la presión del refrigerante en el circuito y conexiones con el presurizador, quien fija la presión de funcionamiento del sistema. Sus modelos se discutirán junto con los de los tubos de presión del núcleo.

## **2.3 - Generador de vapor**

Es el encargado de transferir la potencia térmica del refrigerante del primario al agua liviana del circuito secundario. Dicha agua se evapora y este vapor es transferido a la turbinas, donde la energía térmica se convertirá en energía eléctrica. El modelo se discute más adelante.

## **2.4 - Presurizador**

Es el componente encargado de regular la presión del sistema. Consta de un recipiente, calefactores, válvulas y una línea de compensación de volumen. Dentro del recipiente existe agua pesada tanto en estado líquido como gaseoso, en dos zonas bien diferenciadas. La zona líquida es la inferior y está en contacto con los calefactores que son los encargados de aumentar la presión en el presurizador. Esto se realiza indirectamente al aumentar la densidad de vapor de la zona gaseosa.

Existen dos válvulas en la parte superior del recipiente. Dichas válvulas son las encargadas de eliminar vapor a efectos de bajar la presión. Una de ellas es de seguridad y se utiliza solamente en

casos extremos. La línea de compensación de volumen vincula al presurizador con el circuito primario. Por esta línea circula agua pesada de acuerdo a las variaciones de la masa en el primario. El modelo es una combinación del utilizado en [ROV83] y en [GUI94].

## 2.5 - División del circuito primario en nodos

En lugar de utilizar demoras simples [ROV83] para representar el pasaje de fluido a través de los distintos componentes del circuito primario, dividimos dichos componentes en un conjunto de nodos o celdas (Fig. 1).

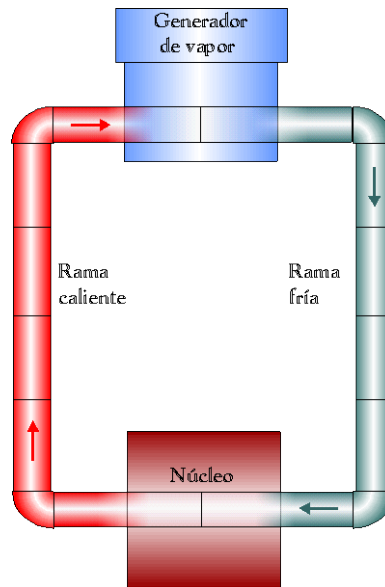


Figura 1. Nodalización del circuito de refrigeración

Cada celda posee como variables entalpía y presión. La circulación de información entre celdas se efectúa tomando la convención de “celda donora”. Es decir, cada celda toma como datos de entrada, para formular sus cálculos, la presión y entalpía de su inmediata anterior. El estado de un nodo dado queda determinado a partir de estas dos variables, excepto en el caso de aquellos nodos que se encuentren dentro del núcleo donde será necesario agregar otras.

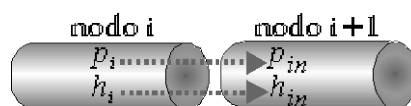


Figura 2. Esquema de celda donora

La entalpía es tratada en forma distinta según el tramo del circuito que se analice. Desde este punto de vista, modelamos tres tipos de celdas:

- Celdas del núcleo: agregan intercambio térmico con el combustible del núcleo;
- Celdas del generador de vapor: agregan intercambio térmico con el circuito secundario;
- Celdas de las ramas frías y calientes: no intercambian calor.

Los modelos matemáticos que rigen a cada celda son tomados de [GUI94].

## 2.6 - Método de resolución de las ecuaciones

Dada la complejidad del modelo matemático, los sistemas de ecuaciones diferenciales que lo componen no poseen solución analítica. Esto nos lleva a utilizar un método numérico de resolución, por lo que elegimos el de Runge – Kutta [McC69] por ser un esquema robusto y relativamente simple de implementar. Luego de implementarlo y de efectuar pruebas comprobamos que el método exhibe un buen comportamiento, manteniendo los tiempos de simulación por debajo del tiempo real (aún en computadoras con escasa capacidad de cálculo) y un alto grado de precisión.

### 3 - Análisis computacional del problema

Entre los componentes de la planta explicados anteriormente existen interacciones: el presurizador está conectado con los lazos de refrigerante para asignar la presión de referencia, las bombas se encuentran intercaladas dentro de éstos y el núcleo del reactor entrega su potencia térmica a los lazos. Lo que nos interesa de esas interacciones es la forma en que varían las propiedades de cada elemento a causa de ellas, es decir, que tipo de información intercambian los elementos.

#### 3.1 - De los elementos de la planta a los objetos del diseño

Existe una correspondencia entre los componentes de la planta y objetos del diseño fácilmente apreciable. A continuación describimos tal correspondencia proponiendo los objetos respectivos:

Componente	Objeto
Núcleo	CompleteCore
Presurizador	Pressurizer
Nodos del lado primario del generador de vapor	SteamGeneratorPipe
Nodos de las ramas fría y caliente	Pipe
Nodos de los tubos de presión del núcleo	CorePipe
Bombas	Pump
Conexiones del circuito primario con el presurizador	PressurizerConnection

3.1.1 - “*CompleteCore*”: Este objeto será el encargado de realizar los cálculos de cinética puntual del reactor, de las reactividades y de entregar la potencia generada en el núcleo a los nodos de los tubos de presión que lo atraviesan.

3.1.2 - “*Pressurizer*”: Calculará la presión de referencia del primario, realizando el cálculo termodinámico de un sistema de dos fases líquido – vapor. Para ello administrará el funcionamiento de los calefactores y de las válvulas de seguridad, como así también efectuará el cálculo del flujo de refrigerante en la línea de compensación de volumen.

3.1.3 - “*SteamGeneratorPipe*”: Estará a cargo de calcular la transferencia térmica entre el circuito primario y el secundario, de modelar la circulación de refrigerante y la caída de presión a través del generador de vapor. Dado que el circuito primario ha sido dividido en nodos, las instancias de esta clase estarán vinculadas entre sí para formar el circuito; los nodos de los extremos se vincularán con las ramas frías y calientes respectivas.

3.1.4 - “*Pipe*”: Modela a los nodos en los que se dividen tanto las ramas frías como las calientes. Si bien las variables de los “*Pipe*” son las mismas que en los “*SteamGeneratorPipe*”, su comportamiento difiere en que en los primeros no hay intercambio térmico con otro componente, cosa que sí ocurre en los últimos.

3.1.5 - “*CorePipe*”: Representa a las divisiones de los tubos de presión del núcleo. Calcula el intercambio térmico con el combustible del núcleo. A partir de la potencia total desplegada por el reactor, calcula la potencia térmica entregada al refrigerante en cada nodo. Además, simula el retardo proveniente de la circulación del refrigerante dentro de los mencionados tubos, como así también la caída en la presión en cada nodo. Se vinculan entre sí y conectan la rama fría con la caliente de cada lazo.

3.1.6 - “*Pump*”: Son ubicadas en el circuito primario para realizar elevaciones en la presión del mismo, manteniendo la temperatura entre las celdas que unen.

3.1.7 - “*PressurizerConnection*”: Representa a la línea de compensación de volumen; une el circuito primario con el presurizador. A través de las instancias de esta clase se fija, en el primario, el punto de

presión del sistema calculado en el presurizador (“Pressurizer”) y se trasladan a este último las variaciones en la temperatura en el mencionado circuito.

### **3.2 - El simulador: vínculo con la planta y administración del método de resolución**

Para la administración de la simulación diseñamos una clase de objetos que denominamos “SimulationManager”. Su funcionalidad consiste en llevar el control del tiempo de la simulación y propagar las señales correspondientes a su incremento al resto de los objetos del modelo. Asimismo, administra el método de resolución de los sistemas de ecuaciones, según el método de Runge – Kutta. En efecto, debido al alto grado de acoplamiento que existe entre las ecuaciones del sistema, la resolución numérica requiere de un cuidadoso análisis. Al hallarse vinculadas por variables que también son objeto del método de resolución, este proceso debe ser hecho por etapas. Es decir, los pasos en la resolución de los próximos valores de variables según Runge – Kutta, deben ser hechos de manera completa para todos los objetos del modelo y en forma sucesiva.

Todos los objetos del modelo de la planta, que intervienen en la simulación, deben responder a cinco mensajes, debido a los cálculos introducidos por el método de resolución de las ecuaciones. Por lo tanto, este será el mecanismo de interacción que existirá entre la instancia de “SimulationManager” y los objetos que describen la planta durante una corrida de la simulación. Además, todos deben implementar un mecanismo que, una vez corrida una simulación, vuelva el estado de los objetos a su configuración inicial.

### **3.3 - Diseño de la planta**

Todos los objetos de la planta deben tener un cierto comportamiento proveniente de su vínculo con el simulador. Dicho comportamiento será ubicado en una clase de objetos que denominamos “BasicElement”. Esta clase define cinco métodos abstractos asociados a los pasos del método de resolución más otro que vuelva el estado del objeto a sus condiciones iniciales.

Por su parte, los distintos objetos de la planta pueden ser clasificados en base a sus variables, las cuales determinan su funcionalidad. La primera división que efectuamos es entre el núcleo, “CompleteCore”, y el resto de los elementos, basándonos en el hecho que el primero no posee presión y entalpía como variables. El modelo de objetos resultante, utilizando la notación de la metodología UML [LAR98], se muestra en la Fig. 3.

En el caso de las subclases de “Cell”, la cual representa a los componentes de los circuitos del primario, fundamentalmente difieren entre sí por el cálculo de la derivada de la entalpía. Por este motivo, en “Cell” se efectúan los cálculos correspondientes al método de resolución utilizando un método template [GAM95] para representar a la derivada de la entalpía. Dicha derivada será definida en cada una de las subclases, pero la estructura del cálculo de cada uno de los pasos del método de resolución queda establecida en esta clase.

### **3.4 – Agrupamiento de los componentes de la planta**

Una vez especificados de manera individual cada uno de los objetos de la planta, debemos organizarlos de forma tal que los vínculos que existan entre ellos se correspondan con los vínculos físicos existentes en la realidad. A tal efecto proponemos la clase “NuclearCentral” como contenedora de los mencionados objetos. Esta clase, además de mantener los vínculos entre los componentes, será la encargada de llevar a cabo los procesos de inicialización y administración de la recuperación y el guardado de las distintas configuraciones de la planta.

“NuclearCentral” es una subclase de “ElementsContainer”. Esta última clase define genéricamente la relación entre el simulador y un modelo completo a simular. De esta forma, estas relaciones permiten la construcción de un simulador general, preparado para simular cualquier modelo que se adapte al método de resolución utilizado. En la figura 4 mostramos la relación que existe entre la planta, los elementos que la componen y el simulador.

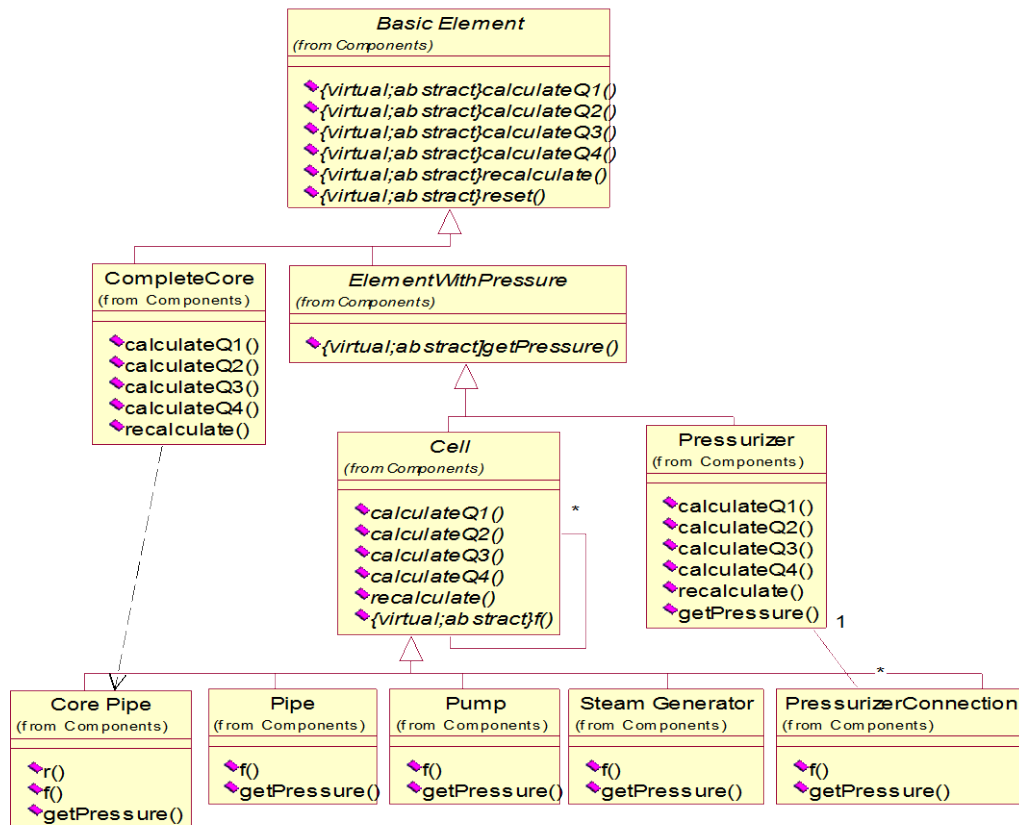


Figura 3. Modelo de objetos del simulador

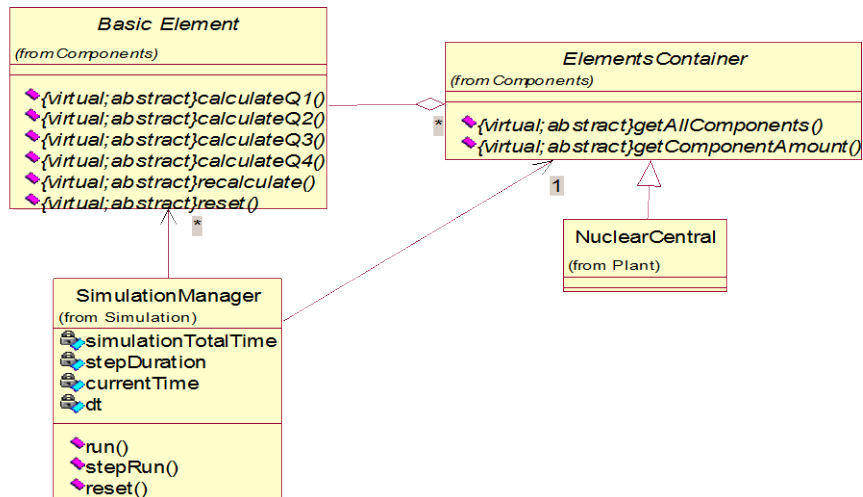


Figura 4. Esquema de agrupamiento de las clases del simulador

#### 4 - Validación del modelo

A efectos de realizar una comprobación del comportamiento del modelo, se realizaron pruebas consistentes en la variación de la potencia en el núcleo y de la temperatura en el secundario. Además se compararon las distribuciones de temperaturas del refrigerante en los tubos de presión con tablas de mediciones efectuadas en la planta. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

#### 4.1 - Pruebas realizadas en el núcleo

Estas pruebas tienen como objetivo mostrar como se comporta la potencia entregada al refrigerante, fijando una distribución de potencia en el núcleo. Se realizaron tres pruebas, graficados en las Figs. 5. Los resultados de todos los tests han sido contrastados con documentos emitidos por la ARN. En todos los casos puede apreciarse que la potencia entregada al refrigerante no supera la potencia máxima admisible, es decir, el 115,4% de la potencia total.

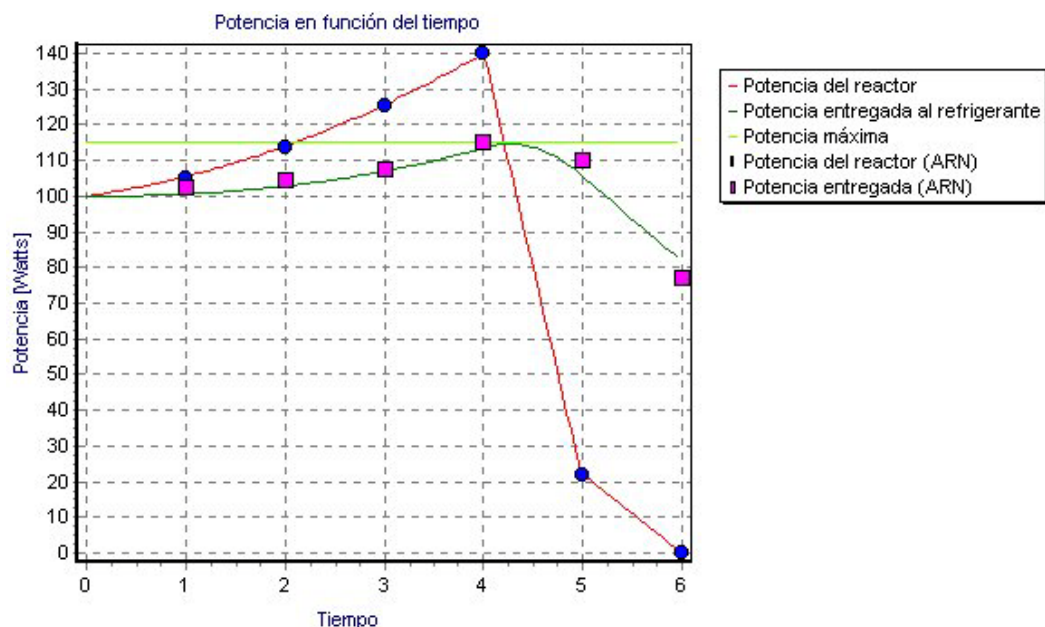


Figura 5a. Rampa media de potencia (se comparan los resultados del presente simulador con cálculos provistos por la ARN)

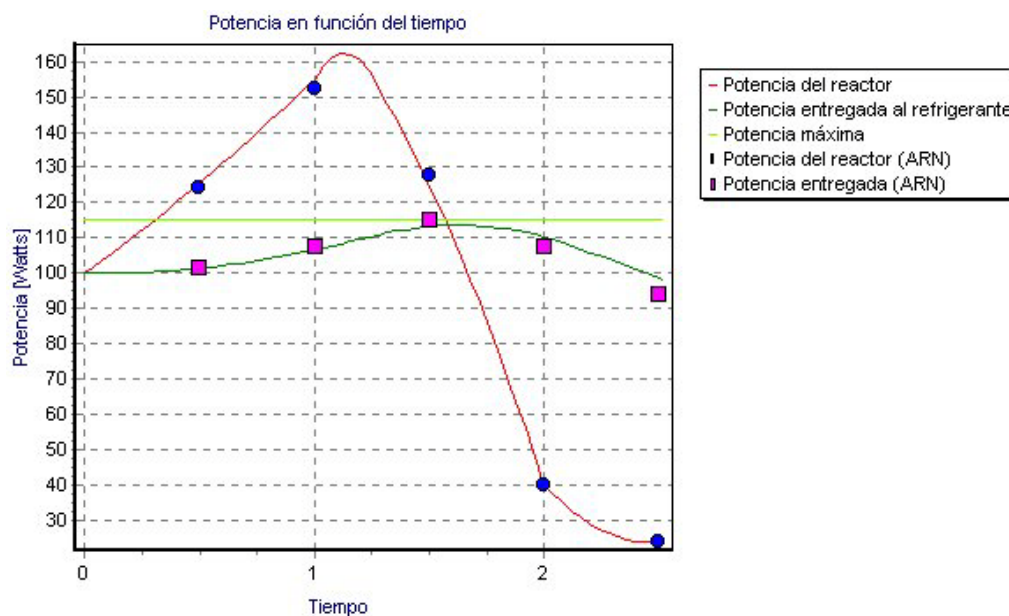


Figura 5b. Rampa alta de potencia (se comparan los resultados del presente simulador con cálculos provistos por la ARN)

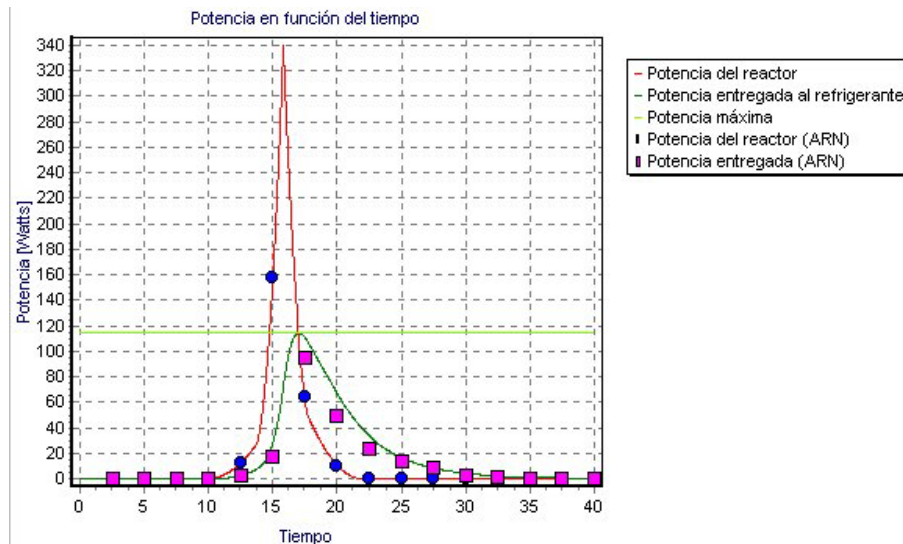


Figura 5c. Excursión de potencia (se comparan los resultados del presente simulador con cálculos provistos por la ARN)

#### 4.2 - Pruebas efectuadas en el generador de vapor

A efectos de verificar el funcionamiento de las reactividades y de los controles en el núcleo introducimos una caída lineal de la temperatura en el lado secundario del generador de vapor. La caída es de 5°C en 20 segundos, a partir del segundo 10 de simulación (Fig. 6). Esta variación produce una caída de la temperatura de refrigerante en las ramas frías y, en consecuencia, a la entrada del núcleo. Al caer la temperatura del refrigerante este introduce reactividad negativa ocasionando una caída en la potencia del reactor, que no puede ser contrarrestada por el pequeño aumento en la reactividad del combustible al perder calor. Este efecto se produce mientras está cayendo la temperatura en el secundario. Cuando esta se estabiliza los sistemas de control vuelven a llevar la potencia del reactor a sus niveles normales.

En el caso de la potencia neta entregada por el reactor al refrigerante, al caer más rápidamente la temperatura del refrigerante que la del combustible, la diferencia entre ambas se hace más grande, lo que produce un aumento en la mencionada potencia. Este efecto, al igual que el anterior, se produce mientras está cayendo la temperatura en el secundario. En el caso de la potencia de fisión, su comportamiento es similar al de la potencia total ya analizado. Podemos ver que por acción de los sistemas de control esta supera las magnitudes deseadas tendiendo luego a estabilizarse.



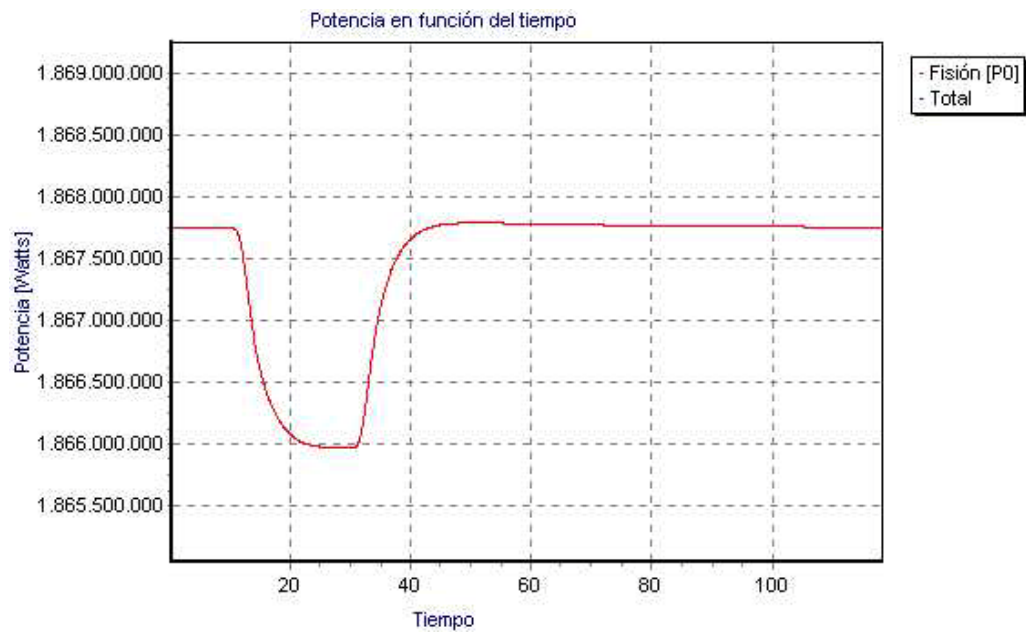


Figura 6a. Caída de temperatura del secundario.

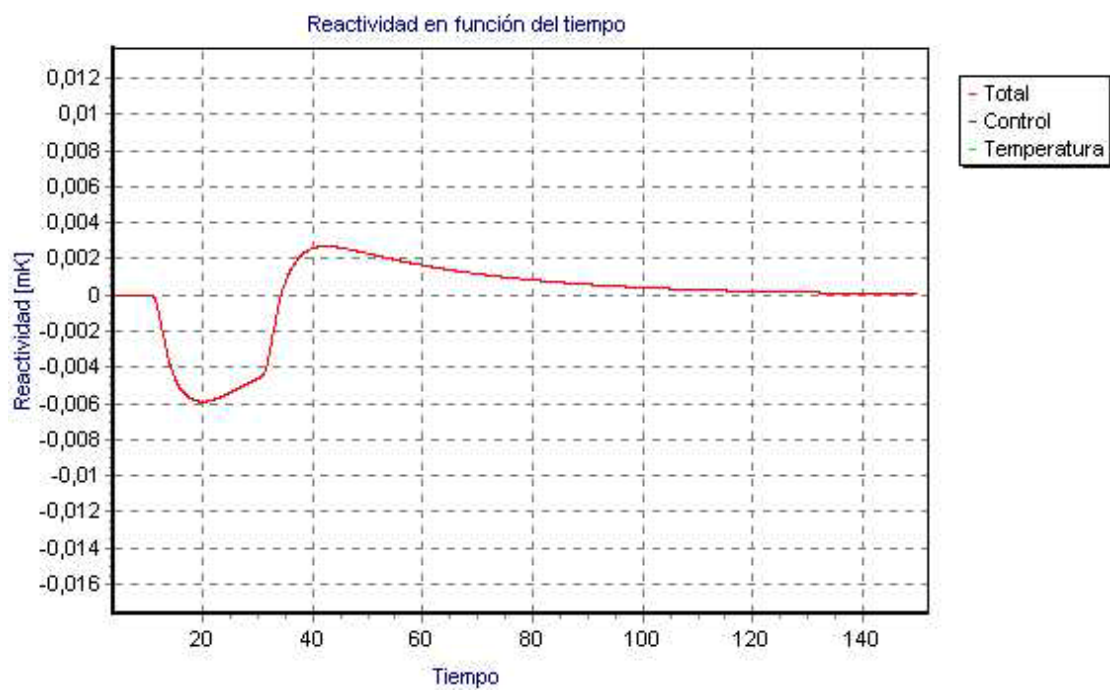


Figura 6b. Caída de temperatura del secundario.

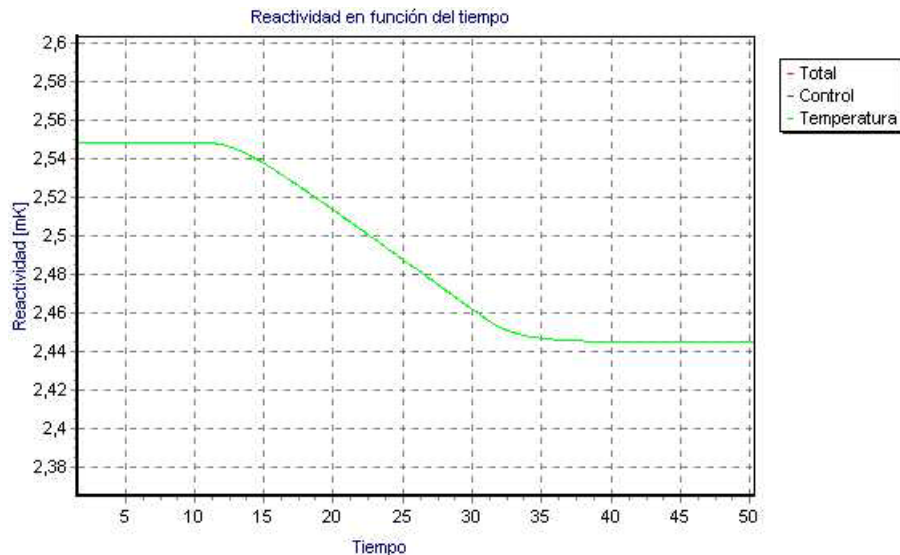


Figura 6c. Caída de temperatura del secundario.

Por último, analizaremos el comportamiento de las reactividades en este test. Podemos ver que la reactividad por temperatura (refrigerante y combustible) cae, prevaleciendo este efecto por el de los sistemas de control. Estos logran imponer sus efectos una vez finalizada la caída de temperatura en el secundario, produciendo el aumento esperado en la potencia generada por el reactor. La relación entre la potencia del reactor y la reactividad total puede apreciarse comparando los gráficos de ambas variables, los cuales son muy parecidos.

### 4.3 - Temperaturas en el núcleo

A continuación mostramos la comparación de las temperaturas del combustible y el refrigerante dentro del núcleo (Fig. 7) Dicha comparación se realiza entre los resultados de la simulación y las distribuciones de diseño de tales magnitudes. Para efectuar la comparación dividimos los tubos de presión que atraviesan el núcleo en 21 nodos. Podemos ver que las distribuciones de la temperatura del combustible son prácticamente idénticas a las provistas por el fabricante, mientras que las de la temperatura del refrigerante difieren en no más de un grado en los nodos con máxima diferencia.

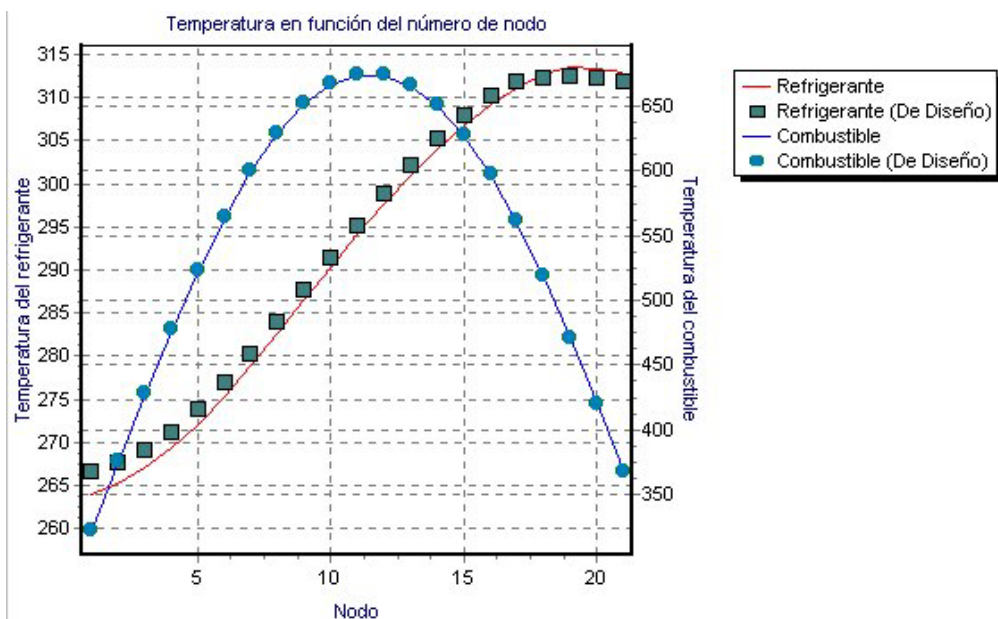


Figura 7. Perfiles de temperatura del núcleo.

## **5 - Conclusiones**

En base a los tests anteriormente presentados, podemos ver que la validación de la aplicación ha arrojado resultados aceptables. De esta forma, el simulador provee una herramienta confiable para el análisis del funcionamiento de la central nuclear y para la realización de futuras extensiones. Estas pueden ser la construcción de nuevos mecanismos de visualización de resultados y la inclusión en el modelo del circuito secundario.

El diseño del esquema básico del simulador, basado en las relaciones entre “SimulationManager”, “BasicElement” y “ElementsContainer”, provee un modelo general para construir nuevas simulaciones o bien extender la ya existente.

La división del circuito primario en nodos permite el estudio de aspectos termodinámicos del reactor en puntos donde era imposible hacerlo utilizando un modelo de retardos. Un ejemplo de esto es la posibilidad de analizar el título a la salida del reactor.

## **6 - Referencias**

[GAM95] – Gamma, Erich – Heln, Richard – Johnson, Ralph – Visside, John – “Design Patterns” – Adison Wesley 1995.

[GUI94] – Guido-Lavalle, Germán – “Código de simulación de transitorios de la central nuclear Atucha I” – Comisión Nacional de Energía Atómica.

[McC69] – McCracken, Daniel – Dorn, William – “Métodos Numéricos y Programación Fortran” – Limesa – Wiley 1969.

[MEO83] – Meoqui, Andrea – “Análisis digital de la dinámica de la planta nuclear de Embalse (Córdoba) durante transitorios de operación normal” – Centro Atómico Bariloche.

[LAR98] – Larman, Cray – “Applying UML and Patterns” – Prentice Hall PTR 1998.

[QUI79] – Quintana, Gerardo – “Fisión y reactores” – Nueva Librería 1979.

[ROV83] – Rovere, Luis – “Modelación de CNE e implementación de un código de cálculo para la simulación del comportamiento dinámico de la planta” – Centro Atómico Bariloche.